第41卷 第3期
2024年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 3
Mar. 2024

DOI:10.13866/j.azr.2024.03.13

新疆能源消费碳排放时空特征及能源结构调整路径探讨

包佳玉[1], 李祥龙[1], 胡启文[1], 李 涛[2,3]

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院,云南 昆明 650093; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 新疆作为我国重要的能源生产与供给基地,合理的协调经济发展与能源碳排放之间的关系,是实现其经济可持续发展与节能减排目标的重要前提。本文在整理新疆各类统计数据的基础上利用空间自相关对新疆2000—2020年能源消费碳排放的时空特征进行了测算和分析。结果表明:(1) 研究期间新疆能源消费碳排放总量呈现逐年增加的趋势,但碳排放强度整体上呈现下降趋势;(2) 碳排放强度的空间分布特征表现为:天山东坡碳排放强度较高,准噶尔北缘、天山北坡和昆仑山北坡则相对较低,并且具有明显的集聚特点;(3) 在全球变暖与碳减排的大背景下,新疆需要从区域资源禀赋特点入手,建立差异化的能源结构调整策略,通过构建多能互补的绿色能源网络,促进区域实现"双碳"目标和社会经济的高质量发展。

关键词: 碳排放强度; 能源消费; 时空特征; 调整路径; 新疆

人类可持续发展正面临着气候变化带来的严重威胁,而持续增长的温室气体排放被认为是加剧气候变化的关键因素[1-2]。为应对和缓解气候变化带来的社会与生态问题,各国政府分别提出在21世纪中叶实现碳中和的目标[3-4]。目前中国CO_2排放量已位居世界第一,中国经济发展及碳排放趋势已成为全球关注的焦点[5-7]。中国政府在"巴黎气候峰会"上承诺我国CO_2排放将在2030年前后达到峰值并争取尽早达峰[8]。尽管中国已经实施了一系列措施和政策来保障碳减排工作的顺利进行,但影响碳排放的因素众多,且区域间自然资源禀赋、社会经济发展和能源结构存在巨大差异,对中国而言全面实现经济的低碳循环仍然是巨大挑战。此外,先前的研究已经证实能源消费的快速增长是区域碳排放上升的最主要因素[9]。因此,揭示区域能源消费碳排放的时空特征,对于促进区域低碳经济的协调发展,提高节能减排政策的科学性和可操作性具有重要参考和借鉴意义[10]。

近年来能源消费碳排放的测算和动态变化已成为碳排放领域研究的热点内容之一,国内外学者对不同尺度的能源消费碳排放做了大量研究[11-13]。Thai等[14]将全球进行分区,并分析对比了各区的能源消费碳排放,结果显示亚洲的碳排放在过去十年中约占全球碳排放总量的三分之一,并对影响亚洲31国碳排放的因素进行了探究,发现除了城市化水平,人均GDP之外,本地的金融政策以及来自外部的投资程度也会影响能源消费碳排放的强度。程叶青等[15]基于空间计量模型和空间自相关分析的方法对中国30个省区的能源消费碳排放强度的时空特征进行了探讨,发现在省区尺度上能源消费碳排放强度具有明显的空间集聚特征。王少剑等[16]以城市为单元,对中国城市能源消费碳排放量进行了计算,其研究结果发现在1992—2013年期间中国城市的人均能源消费碳排放强度呈现逐年增加的趋势。以上研究对能源消费碳排放的核算做了较为系统的分析,对本研究具有重要的借鉴和参考价

收稿日期: 2023-12-26; **修订日期:** 2023-01-23
基金项目: 中国科学院新疆生态与地理研究所基础前沿项目(JCQY-X03)资助
作者简介: 包佳玉(1997-),女,硕士研究生,主要从事资源与环境研究. E-mail: christina_baob@163.com
通讯作者: 胡启文. E-mail: jianghu4592@126.com
490-498页

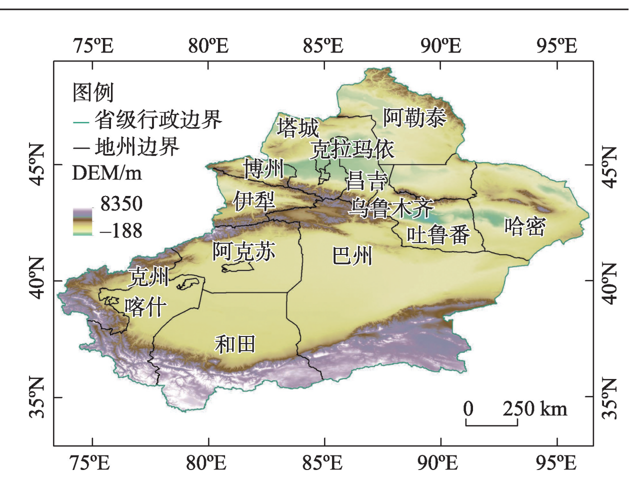
值。然而，已有的研究主要集中在经济较为发达的大都市区域，而对经济欠发达的区域关注较少[13-14,17-18]。就中国而言，以往的学者针对东南沿海经济发达区域的能源消费碳排放的时空特征与变化机制做了大量研究[19-20]，而对西北部经济落后区域的研究则较少[21-22]。我国中东部地区能源消费量占全国比重超过70%，生产量占比不足30%，重要的能源基地主要分布在西部地区，新疆整体能源生产与消费分布不均。新疆丰富的油气资源使其成为我国重要的能源保障基地，仅煤炭储量就占全国40%[23]，已经形成了"西电东送、北煤南运、西气东输"的能源流向格局。

随着新时期西部大开发战略的深入实施，新疆经济水平得到稳步提高，但与此同时工业结构重碳特征明显[24]，在"双碳"目标的约束下新疆地区未来经济增长将面临更大的挑战[25-27]。合理统筹新疆经济发展与能源消费碳排放之间的关系，是实现新疆经济可持续发展的重要前提[28]。过去的大多数研究都将研究单元看作彼此独立、均一的个体，忽视了相邻单位之间的空间联系和相关程度。先前的研究结果已经证明，区域能源消费碳排放具有明显的空间溢出和聚集效应[15-16,21,29-30]。而空间自相关的方法能够通过利用空间权重矩阵揭示地理单元与邻域单元间的空间关系与关联程度。本研究以新疆地州（市）为研究单元，通过空间自相关分析的方法识别地州单元及其邻近单元间的空间关系和相似程度，评估2000年西部大开发以来新疆能源消费碳排放强度的时空特征，研究区域能源结构差异性调整方案，对实现区域资源禀赋优势转化为经济优势具有现实意义，能为我国发展低碳经济提供科学理论支撑。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

新疆维吾尔自治区位于我国的西北地区（73°32′~96°21′E、34°22′~49°33′N），土地辽阔[31]，总面积达166×10⁴ km²，是我国最大的省级行政区（图1）。新疆的地形特点可以用"三山夹两盆"来概括，其中"三山"指的是北部的阿尔泰山、中部的天山以及南部的昆仑山，"两盆"则分别指北部的准噶尔盆地以及南部的塔里木盆地[32]。新疆拥有丰富多样的矿产资源，储量巨大，已发现位于整个新疆地区的重要成矿带可达上百个[33]。



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为新S(2021)047号，对底图边界无修改。下同。

图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

1.2　数据来源

本研究所涉及的新疆14个地州的能源消费数据和空间计量模型所需的各类指标数据，均来自《新疆统计年鉴》(2001—2021年)、《新疆五十年(1955—2005年)》、各地政府工作报告及各地州统计年鉴等。单位热值含碳量、碳氧化率和平均低位发热量数据来源《省级温室气体清单编制指南(试行)》；折标准煤系数数据来源于《综合能耗计算通则GBT2589-2020》[7]。

1.3　研究方法

1.3.1　碳排放强度测算　本文采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)所给出的方法，选取原煤、原油、天然气三种化石燃料的消费量来估算新疆各地州（市）的碳排放量[15]。碳排放量公式具体如下：

$$E_{ijk}=AD_{ijk}\times CC_i\times OF_i\times\frac{44}{12} \quad (1)$$

$$AD_{ijk}=FC_{ijk}\times NCV_i\times 10^{-6} \quad (2)$$

式中：i为化石燃料种类；k为时间(年)；j为地区；E_{ijk}为i种化石燃料在j地区第k年的碳排放量(t)；AD_{ijk}为i化石燃料在j地区第k年的活动水平(TJ)；CC_i为化石燃料i中的碳含量($t\cdot TJ^{-1}$)；OF_i为化石燃料i的碳氧化率(%)；44/12为CO_2与C的相对分子质量之比；FC_{ijk}对应第i种化石燃料在j地区第k年的用量，固态或液体燃料单位为t，气体燃料单位为m^3；NCV_i为化石燃料i的平均低热值，固态或液体燃料单位为$kJ\cdot t^{-1}$，气体燃料单位为$kJ\cdot m^{-3}$；主要化石能源平均低位发热量与折标系数见表1。

表1 各类能源的平均低位发热量与折标系数

Tab. 1 Average low calorific value and standard coal coefficient

	单位热值含碳量/(t·TJ^{-1})	碳氧化率/%	平均低位发热量	折标准煤系数
原煤	26.37	94	20934 kJ·kg^{-1}	0.714 kgce·kg^{-1}
原油	20.08	98	41868 kJ·kg^{-1}	1.429 kgce·kg^{-1}
天然气	15.32	99	38979 kJ·m^{-3}	1.330 kgce·m^{-3}

注:kgce为千克标准煤。

本文碳排放强度的公式[16]如下:

$$CEI_{jk}=\frac{E_{ijk}}{GDP_{jk}} \tag{3}$$

式中:CEI_{jk}为j地区三种化石燃料第k年的碳排放强度[t·(10^{4}元)$^{-1}$];GDP_{jk}为j地区第k年的地区生产总值(10^{4}元)。

1.3.2 空间相关分析

(1) 全局空间自相关

利用全局空间自相关(Global Moran's I)来揭示新疆各地州(市)的能源消费碳排放强度空间关联程度的总体特征,具体公式如下:

$$I=\frac{n\sum_{j=1}^{n}\sum_{f=1}^{n}w_{jf}\left(y_j-\bar{y}\right)\left(y_f-\bar{y}\right)}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{f=1}^{n}w_{jf}\sum_{j=1}^{n}\left(y_j-\bar{y}\right)^2} \tag{4}$$

式中:I代表的是莫兰指数(Moran's I),取值范围在-1~1之间;当I大于0,代表碳排放强度存在空间正相关关系;I小于0,代表存在空间负相关关系;若I的值等于0或接近0,代表空间随机分布,不具有空间相关性;n为新疆地州(市)总个数;y_j为区域j的碳排放强度;y_f为区域j邻近空间f的碳排放强度;$\bar{y}$为所有地州(市)碳排放强度的平均值;w_{jf}为空间权重值。通过Z值来检验Moran's I是否服从正态分布,若$|Z|>1.96$,通过了0.05显著性水平($P<0.05$),则认为Moran's I显著。

(2) 局域空间自相关

基于局域空间自相关(LISA)揭示新疆各地州(市)能源消费碳排放强度之间的空间关联程度,将其分类为四种类型,分别是HH(高-高)、HL(高-低)、LH(低-高)和LL(低-低)。其中,HH(LL)表示存在正的空间自相关,即碳排放强度在空间上存在高(低)的集聚效应。HL(LH)表示存在负的空间自相关,即碳排放强度高(低)地区被低(高)地区包围。通过局域空间自相关碳排放强度空间转移,将精确刻画区域能源消费的区域空间强度变化,为区域能源结构调整提供重要依据。

2 结果与分析

2.1 新疆能源消费碳排放强度时空变化

由图2可以看出,2000—2020年新疆能源消费碳排放总量整体上呈现快速增加的趋势,年均增速可达1948.28×10^4 t。在2000—2014年增加速度较快,2014—2020年期间则是先缓慢减少后迅速增加。与碳排放量不同,碳排放强度整体上呈现下降的趋势。能源消费碳排放总量与碳排放强度呈相反的变化趋势,可能是因为在2000年实施西部大开发后新疆GDP逐年增长,年均增长率达12.27%,明显高于能源消费碳排放量的增长率(10.62%)。GDP的增速大于能源消耗碳排放的增速与产业升级、技术进步、设备更新有关。其中相比2017年和2019年,2018年碳排放量和强度都有明显下降,究其原因可能是由于新疆地区在该时期出现了电力"供大于求"的现象,且弃风、弃光现象严重[34]。为避免资源浪费,新疆发电小时数在2018年有明显减少,导致能源消费总量下降,碳排放总量和强度也随之减少。

结合能源消费碳排放强度的时间变化特征以及研究的时间步长,以2000年、2005年、2015年和

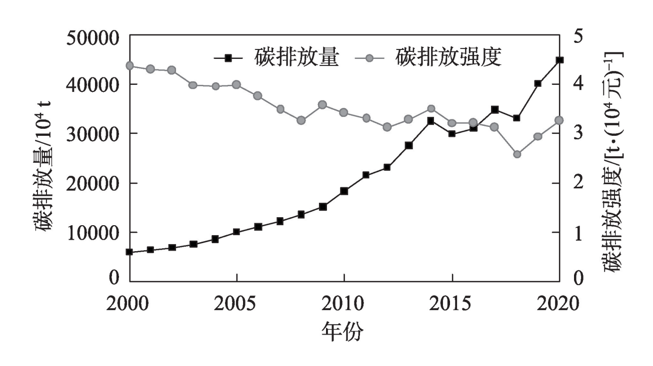


图2 2000—2020年新疆能源消费碳排放总量和强度变化趋势

Fig. 2 Trends of total amount and intensity of carbon emissions from energy consumption in Xinjiang, 2000-2020

2020年为例揭示新疆各地州能源消费碳排放强度的空间分布。由图3可知,新疆各地区能源消费碳排放强度的空间差异明显,整体呈现东高西低,北高南低的空间特征。高碳排放强度[>4.5 t·(10^4元)$^{-1}$]的地区主要分布在以乌鲁木齐市、克拉玛依市为核心的天山北坡经济带以及哈密、吐鲁番等东疆地区。碳排放强度较低的区域则主要集中在以克州、和田为核心的南疆地区。从碳排放强度的空间变化来看,2000—2020年碳排放强度显著增大的是昌吉、哈密以及吐鲁番等地区,而阿勒泰、阿克苏、和田以及巴州等地区的碳排放强度明显减小。

2.2 新疆能源消费碳排放强度的空间聚集特征

对2000—2020年的新疆能源消费碳排放强度进行了全局Moran's *I*指数分析(图4)。在研究时段内新疆能源消费碳排放强度的Moran's *I*指数均为正值,除2007年、2008年和2011年外,其他年份的Moran's *I*均通过了显著性检验(P<0.05)。Moran's *I*指数整体表现出"U"型波动趋势,2005年、2015年是两个时间拐点。从2000—2004年,Moran's *I*指数保持在0.25~0.28之间,2005年后开始下降,2005—2013年稳定在一个相对较低的范围,这表明区域内的碳排放强度集聚情况有所下降。然而,从2015年起,Moran's *I*指数值较大且上升较快,表明区域内的碳排放强度空间聚集性越来越高。这可能是因为在2015年能源消费红线确定后[26],各地州的产业发展方向进一步明确,区域内经济增长对于资源依赖程度不断增强,各地州间的能源消费碳排放空间联系骤然加强。

同样以2000年、2005年、2015年和2020年为例,利用局部自相关(LISA)聚类图对新疆能源消费碳排放强度的局部空间自相关性进行分析(图5)。结果表明,能源消费碳排放强度在空间分布上的集聚特征显著,总体以HH集聚和LL集聚类型为主,其中HH集聚的地区主要分布在新疆东部区域,LL集聚的地区则集中分布于准噶尔北缘、天山南坡和昆仑山北坡。2000年HH和LL型的地区分别为4个和7个,占地区总数的78.5%,新疆区域的能源消费碳排放强度在地理布局上显现出明显的二元结构。到了2005年,HH类的地区增加了两个,但LL类的地区却有所减少,新疆各地区的能源消费碳排放强度的空间集聚程度稍有降低。2015年与2005年相比,LL型的地区增加了1个,而HH型地区的数量则减少了两个,表明该时期碳排放强度较低地区

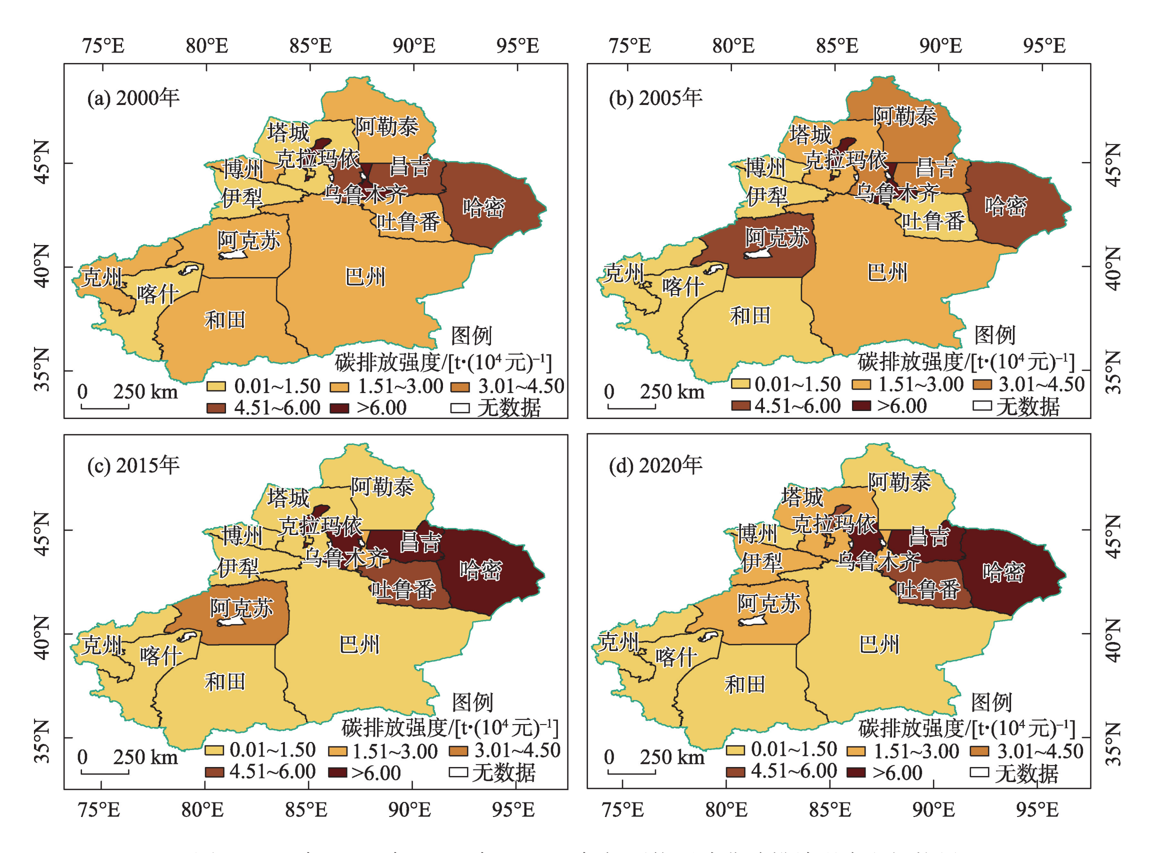


图3　2000年、2005年、2015年和2020年新疆能源消费碳排放强度空间格局

Fig. 3　Spatial patterns of Xinjiang's carbon emission intensity of energy consumption in 2000, 2005, 2015 and 2020

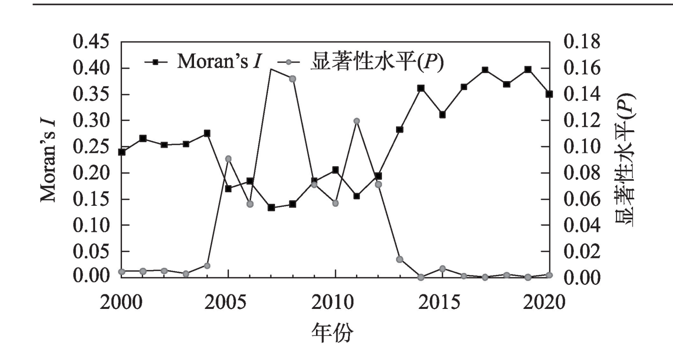


图4 2000—2020年新疆能源消费碳排放强度全局Moran's *I*指数

Fig. 4 Global Moran's *I* of Xinjiang's carbon emission of energy consumption intensity in 2000−2020

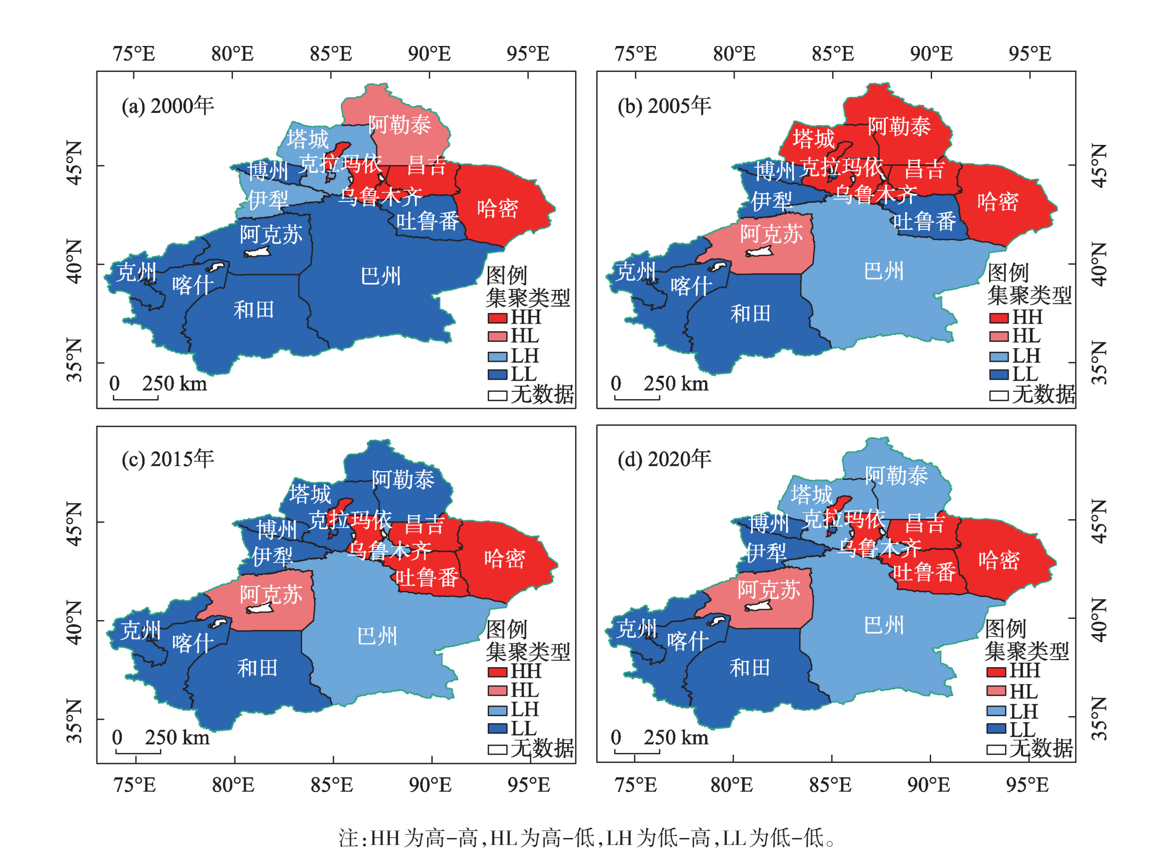
的空间集聚度有增加，而碳排放强度较高地区的空间集聚度有所降低。2020年与2015年相比，LL型地区减少了两个转化为LH型，表明2015—2020年期间，碳排放强度较低地区的空间集聚度有所降低，离散程度增加。

为进一步分析能源消费碳排放强度的空间聚集特性，本文采用时空跃迁法制作了2000年、2005年、2015年和2020年集聚类型的时空转移矩阵(表2)。由表2可以看出研究区内的碳排放强度分布存在明显的空间固化或路径依赖特性。其中，昌吉地区、哈密地区、克拉玛依市一直处于碳排放热点区域，这些地区化石能源资源相对富集，拥有较为雄厚的能源产业基础；和田、博州、克州、喀什地区则处于碳排放冷点区域，主要以经济欠发达及能矿资源相对贫乏的地区为主。以上两种聚集随着时间的演化逐渐趋于稳定，主要原因是随着区域优势资源转换战略的实施，区域经济增长的动力大多来自于依托能源资源优势和成本优势发展的煤炭产业、煤化工产业、火电产业、石油化工产业等，致使区域发展对能源矿产资源的依赖度不断增强，因而能源消费碳排放强度空间分布表现出路径依赖的特征。

3 讨 论

3.1 新疆能源消费结构变化分析

随着新时期西部大开发战略的实施，以及新疆新型城镇化和新型工业化进程将进一步加快，"双碳"目标约束下的区域社会经济可持续高质量发展正面临着严峻的挑战。新疆煤炭丰富，探明储量占



注：HH为高-高，HL为高-低，LH为低-高，LL为低-低。

图5 2000年、2005年、2015年和2020年能源消费碳排放强度LISA图

Fig. 5 The LISA distribution of Xinjiang's carbon emission intensity of energy consumption in 2000, 2005, 2015 and 2020

表2 集聚类型时空转移矩阵

Tab. 2 Space-time transition matrices

时期	集聚类型	HH	LH	LL	HL
2000—2005年	HH	昌吉、哈密、乌鲁木齐、克拉玛依			
	LH	塔城		伊犁	
	LL		巴州	和田、博州、克州、喀什、吐鲁番	阿克苏
	HL	阿勒泰			
2005—2015年	HH	昌吉、哈密、克拉玛依	乌鲁木齐	塔城、阿勒泰	
	LH		巴州		
	LL	吐鲁番		和田、博州、克州、喀什、伊犁	
	HL				阿克苏
2015—2020年	HH	昌吉、哈密、克拉玛依、吐鲁番			
	LH		乌鲁木齐、巴州		
	LL		阿勒泰、塔城	和田、博州、克州、喀什、伊犁	
	HL				阿克苏

注:HH为高-高,HL为高-低,LH为低-高,LL为低-低。

全国的40%,是国家未来能源安全的重要潜力保障区。根据新疆发改委统计数据,2020年新疆煤炭能源消费占总能源消费高达70.90%,煤炭的碳排放量占比达到74.44%,作为新疆第二大碳源的原油碳排放量占比为12.23%,传统化石能源是支撑区域经济发展的主要能源基础,新疆多年来形成的高碳路径对其依赖程度依然较大[35]。从2000年以来新疆能源消费碳排放时空变化特征来看,新疆能源消费碳排放总量呈现持续增加,碳排放强度总体上则呈现出逐年下降的趋势,要实现能源消费碳排放总量和强度双控目标,昌吉州、克拉玛依市、哈密地区和吐鲁番地区等是未来高碳强度减排的重点关注区域。

3.2 新疆能源结构调整路径

发展清洁能源是未来能源格局调整的重要路径。根据统计年鉴数据,新疆清洁能源消费占比仅为13.7%,相比全国25.5%的清洁能源消费占比,所占绝对比例依然较低。新疆年平均总太阳辐射为6200~7311 MJ·m^{-2},远高于我国年平均总太阳辐射(4911 MJ·m^{-2}),新疆年晴空指数变化范围为0.59~0.65,是我国太阳能光热资源最丰富的地区之一[36-38]。因此,构建依托“沙戈荒”大力发展“风光水火储运”的多功能互补的绿色能源网络,是新疆未来国家能源安全基地建设和实现“双碳”目标的重要途径。

(1) 北疆和东疆地区新疆煤炭资源最为丰富,是“西电东送”的国家重要能源安全基地,但该区高耗能产业占比较高,能源消费总量大,碳排放居高不下,尤其要严格控制能源消费用量和碳排放强度两项指标。北疆和东疆地区煤炭资源具有热量高、富油和灰分少等特点,在承担国家能源安全保障基地的前提下,区内高碳排放强度的昌吉州、克拉玛依市、哈密市和吐鲁番地区等,应通过科技创新率先大力发展以煤炭资源开发为主的气-油-氢-烃等全链条煤化工产业体系,延长产业链增加下游产品附加值,带动区域经济高质量发展。

(2) 南疆地区工业生产基础薄弱,农业和林果业占比大,煤炭资源相对匮乏但光照资源丰富且具有广袤的荒漠,具有发展光伏产业的巨大潜力。从近20 a新疆碳排放时空变化来看,除阿克苏地区碳排放处于中等级别外,南疆大部分地区能源消费碳排放强度较低,且近一段时期内能源自给可以得到保障。作为国家巩固脱贫攻坚的重点区域,发展新型产业是必然趋势,南疆四地州能源结构调整应以大力发展光伏产业为主,结合蓄水电站建设和改造,构建“光风水储送”互补的新能源体系,加快建设南疆电力外送通道,提升我国西南地区因气候变化降水减少引起的水能安全的保障能力。

(3) 充分考虑风光能源的区域差异和不确定性,在全疆范围内谋划构建新型储能基地,建设“疆内南北互补、疆外西电东送”的多能互补的绿色综合能源网络,为国家能源安全保障方面发挥新疆能源基地的重要作用。

此外,新疆肩负着国家能源安全和区域碳排放减排达标的双重任务,实现“双碳”目标需要立足能源资源优势的基本区情,要从近期和远期两个阶段

探讨新疆与全国协调的能源消费结构调整路径。近期2030年,要在统筹考虑传统能源在全国能源安全布局定位的基础上,研究制定新疆传统能源在全国能源安全的保供比例,保障长期稳定的传统能源行业开发强度。远期2060年,通过多能互补的绿色能源网络建设,实现清洁能源占比70%以上的规模[39],保障"双碳"目标的区域达标,推动我国绿色低碳能源的发展。

4 结 论

通过对新疆能源消费碳排放强度时空变化分析和新疆能源消费碳排放强度的空间聚集特征分析,得出以下结论:

(1) 2000—2020年新疆能源消费碳排放总量呈现逐年增加的趋势,但碳排放强度整体上呈现下降趋势。

(2) 从碳排放强度的空间分布来看,天山东坡碳排放强度较高,准噶尔北缘、天山北坡和昆仑山北坡则相对较低,并且具有明显的集聚特点。

在全球变暖与碳减排的大背景下,新疆需要基于本地区资源分布的特点和能源消耗碳排放的时空特征,适当调整区域能源结构的策略。北疆和东疆地区在保证国家用电安全的基础上,应大力发展以煤炭资源开发为主的全链条煤化工产业体系,提高化石能源的利用率。南疆地区应以发展光伏能源为主,构建"光风水储送"互补的新能源体系。通过建设全疆"一盘棋"的多能互补和稳定运行的绿色综合能源网络,为国家能源安全发挥新疆能源基地的重要保障作用。

参考文献(References):

[1] Rogelj J, Forster P M, Kriegler E, et al. Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets[J]. Nature, 2019, 571(7765): 335-342.

[2] 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2050年大气CO_2浓度控制: 各国排放权计算[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(8): 1009-1027. [Ding Zhongli, Duan Xiaonan, Ge Quansheng, et al. Control of atmospheric CO_2 concentration by 2050: An allocation on the emission rights of different countries[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2009, 39(8): 1009-1027.]

[3] 刘燕华, 葛全胜, 何凡能, 等. 应对国际CO_2减排压力的途径及我国减排潜力分析[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 675-682. [Liu Yanhua, Ge Quansheng, He Fanneng, et al. Countermeasures against international pressure of reducing CO_2 emissions and analysis on China's potential of CO_2 emission reduction[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 675-682.]

[4] 刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳排放数据核算[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(7): 878-887. [Liu Zhu, Guan Dabo, Wei Wei. Carbon emission accounting in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(7): 878-887.]

[5] Yang Yuantao, Shen Qu, Cai Bofeng, et al. Mapping global carbon footprint in China[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2237.

[6] Wang Yafei, Liao Meng, Wang Yafei, et al. The impact of foreign direct investment on China's carbon emissions through energy intensity and emissions trading system[J]. Energy Economics, 2021, 97(5): 105212.

[7] Shan Yuli, Huang Qi, Guan Dabo, et al. China CO_2 emission accounts 2016-2017[J]. Scientific Data, 2020, 7(54): 1-9.

[8] 刘卫东, 张雷, 王礼茂, 等. 我国低碳经济发展框架初步研究[J]. 地理研究, 2010, 29(5): 778-788. [Liu Weidong, Zhang Lei, Wang Limao, et al. A sketch map of low-carbon economic development in China[J]. Geographical Research, 2010, 29(5): 778-788.]

[9] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Wang Wanjing, et al. Spatial econometric analysis of carbon emissions from energy consumption in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4): 630-642.

[10] 曹俊文. 江西省产业部门碳排放特征及减排途径——基于1992—2007年投入产出分析[J]. 经济地理, 2011, 31(12): 2111-2115. [Cao Junwen. Characteristics of Jiangxi's industrial sector carbon emissions intensity and carbon reduction approach——input-output analysis based on the 1992 to 2007[J]. Economic Geography, 2011, 31(12): 2111-2115.]

[11] Xu Shichun, He Zhengxia, Long Ruyin, et al. Factors that influence carbon emissions due to energy consumption based on different stages and sectors in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115: 139-148.

[12] 陶俊逸, 赵筱青, 陈彦君, 等. 云南省能源消费碳排放时空演变及其影响因素[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(9): 178-187. [Tao Junyi, Zhao Xiaoqing, Chen Yanjun, et al. Spatial and temporal evolution of carbon dioxide emissions from energy consumption and influencing factors in Yunnan Province[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(9): 178-187.]

[13] 王青, 傅莉媛, 孙海添. 中国工业生产能源消费碳排放的区域差异、动态演进与影响因素[J]. 资源科学, 2023, 45(6): 1239-1254. [Wang Qing, Fu Liyuan, Sun Haitian. Regional differences, dynamic changes, and influencing factors of carbon emissions from industrial production energy consumption in China[J]. Resources Science, 2023, 45(6): 1239-1254.]

[14] Le Thai-Ha, Le Ha-Chi, Taghizadeh-Hesary Farhad. Does financial inclusion impact CO_2 emissions? Evidence from Asia[J]. Finance Research Letters, 2020, 34: 101451.

[15] 程叶青, 王哲野, 张守志. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431. [Cheng

Yeqing, Wang Zheye, Zhang Shouzhi. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10): 1418-1431.]

[16] 王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 414-428. [Wang Shaojian, Su Yongxian, Zhao Yabo. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 414-428.]

[17] 吕志超, 刘雁, 李佳茹, 等. 基于LMDI的河北省能源消费碳排放核算及因素分析[J]. 环境生态学, 2023, 5(4): 74-78. [Lv Zhichao, Liu Yan, Li Jiaru, et al. Calculation and factor analysis of energy consumption carbon emissions in Hebei Province based on LMDI [J]. Environmental Ecology, 2023, 5(4): 74-78.]

[18] 杨振, 李泽浩. 中部地区碳排放测度及其驱动因素动态特征研究[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 13-20. [Yang Zhen, Li Zehao. Research on the measurement of carbon emissions and dynamic characteristics of its driving factors in central regions of China[J]. Ecological Economy, 2022, 38(5): 13-20.]

[19] 王长建, 汪菲, 张虹鸥, 等. 广东省能源消费的动态演变及其驱动机制研究[J]. 资源与产业, 2019, 21(5): 9-19. [Wang Changjian, Wang Fei, Zhang Hong'ou, et al. Dynamic evolution and its mechanism of energy consumption in Guangdong Province[J]. Resources & Industries, 2019, 21(5): 9-19.]

[20] 宋府霖, 韩传峰, 滕敏敏. 长三角地区能源消费碳排放驱动因素分析及优化策略[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 21-28. [Song Fulin, Han Chuanfeng, Teng Minmin. Analysis of driving factors and optimization strategies of energy consumption carbon emissions in the Yangtze river delta[J]. Ecological Economy, 2022, 38(4): 21-28.]

[21] 杨清可, 王磊, 朱高立, 等. 中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势[J/OL]. 环境科学, 2023: 1-17. [Yang Qingke, Wang Lei, Zhu Gaoli, et al. Spatio-temporal evolution, dynamic transition, and convergence trend of urban carbon emission intensity in China[J/OL]. Environmental Science, 2023: 1-17.]

[22] 王素凤, 洪剑涛, 李化夫. 中国城市能源消费碳排放影响因素的时空异质性[J/OL]. 世界地理研究, 2024: 1-14. [Wang Sufeng, Hong Jiantao, Li Huafu. Spatial and temporal heterogeneity of factors influencing carbon emissions from energy consumption in Chinese cities[J/OL]. World Regional Studies, 2024: 1-14.]

[23] 杜宏茹, 李雪梅, 王长建. 新疆能矿资源型产业发展及其区域效应研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 363-369. [Du Hongru, Li Xuemei, Wang Changjian. Study on development and regional effects of the energy and mineral resources sectors in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 363-369.]

[24] 宋香荣, 苏斌, 杨福德. 能源环境约束下新疆工业结构调整优化研究[J]. 新疆财经, 2013, 32(6): 51-56. [Song Xiangrong, Su Bin, Yang Fude. A study of industrial structural optimization on the constraints of energy and environment in Xinjiang[J]. Finance & Economics of Xinjiang, 2013, 32(6): 51-56.]

[25] 胡方芳, 陈前利. 新疆碳排放峰值预测[J]. 区域治理, 2019, 3(42): 37-41. [Hu Fangfang, Chen Qianli. Prediction of peak carbon emission in Xinjiang[J]. Regional Governance, 2019, 3(42): 37-41.]

[26] 高志刚, 李明蕊. 正式和非正式环境规制碳减排效应的时空异质性与协同性——对2007—2017年新疆14个地州市的实证分析[J]. 西部论坛, 2020, 30(6): 84-100. [Gao Zhigang, Li Mingrui. Spatial-temporal heterogeneity and synergy for the effect of formal and informal environmental regulation on carbon emission reduction: Empirical analysis of 14 prefectures of Xinjiang during 2007-2017[J]. West Forum, 2020, 30(6): 84-100.]

[27] 夏婷婷, 南海明, 高岷, 等. 新能源耦合煤化工及综合性能源走廊探索——产业兴疆路径研究[J]. 煤化工, 2022, 50(4): 3-9. [Xia Tingting, Nan Haiming, Gao Min, et al. Exploration on new energy coupling with coal chemical industry and comprehensive energy corridor——Research on Xinjiang industry revitalization pathway[J]. Coal Chemical Industry, 2022, 50(4): 3-9.]

[28] 王长建, 杜宏茹, 汪菲. 能源消费对新疆经济发展的影响机理[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1163-1169. [Wang Changjian, Du Hongru, Wang Fei. Mechanism of energy consumption on the regional development in Xinjiang from 1978 to 2010[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(6): 1163-1169.]

[29] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118. [Wang Shaojian, Xie Zihan, Wang Zehong. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO_2 emissions at the county level of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3103-3118.]

[30] Liu Xiaojie, Jin Xiaobin, Luo Xiuli, et al. Quantifying the spatiotemporal dynamics and impact factors of China's county-level carbon emissions using ESTDA and spatial econometric models[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 410(7): 137203.

[31] 杨琳琳, 李波, 付奇. 基于BP神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 216-222. [Yang Linlin, Li Bo, Fu Qi. Scenario analysis of water resources carrying capacity in Xinjiang based on BP neural network model[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(2): 216-222.]

[32] 柴强, 盛建东, 武红旗, 等. 新疆草地土壤厚度及与地形特征的相关性[J]. 中国草地学报, 2015, 37(5): 18-23. [Chai Qiang, Sheng Jiandong, Wu Hongqi, et al. Soil depth of grassland in Xinjiang and the correlations with terrain attributes[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(5): 18-23.]

[33] 强建华, 于浩. 新疆矿山环境遥感监测成果综述[J]. 中国地质调查, 2016, 3(5): 28-34. [Qiang Jianhua, Yu Hao. Review on remote sensing monitoring results of mine geological environment in Xinjiang[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(5): 28-34.]

[34] 郭森, 崔永军, 贾浩, 等. 新疆电力供需预测及电能消纳有效途径研究[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 147-153. [Guo Sen, Cui Yong-

jun, Jia Hao, et al. Research on electricity supply and demand forecasting and efficient path of electricity consumption in Xinjiang[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 147−153.]

[35] 吕清刚, 柴祯. “双碳”目标下的化石能源高效清洁利用[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 541−548. [Lv Qinggang, Chai Zhen. Highly efficient and clean utilization of fossil energy under carbon peak and neutrality targets[J]. Bulletin of Chinese Academy of Scences, 2022, 37(4): 541−548.]

[36] 姚玉璧, 郑绍忠, 董宏昌, 等. 中国西北地区太阳辐射时空分异特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 863−873. [Yao Yubi, Zheng Shaozhong, Dong Hongchang, et al. Anomaly temporal-spatial distribution of solar radiation in Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 863−873.]

[37] 孙若晨, 熊康宁, 郭应军, 等. 喀斯特地区太阳能资源评估研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(9): 5−10, 27. [Sun Ruochen, Xiong Kangning, Guo Yingjun, et al. Research progress of solar energy resource evaluation in Karst areas[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(9): 5−10, 27.]

[38] 顾玮, 古丽·加帕尔, 尹瀚民, 等. 新疆南疆地区太阳能资源时空分布特征及区划研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1665−1675. [Gu Wei, Guli Jiapaer, Yin Hanmin, et al. Spatial and temporal distribution characteristic and division research of solar energy resources in southern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1665−1675.]

[39] Zhang Ning, Duan Huabo, Shan Yuli, et al. Booming solar energy is encroaching on cropland[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(11): 932−934.

Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption and the approach to energy structure adjustment in Xinjiang

BAO Jiayu[1], LI Xianglong[1], HU Qiwen[1], LI Tao[2,3]

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As an important energy production and supply base in China, Xinjiang plays a pivotal role in the delicate balance between economic development and carbon emissions. Ensuring a harmonious coordination between these factors is essential to achieve sustainable economic growth and meet goals related to energy conservation and emission reduction. This paper measures and analyzes the spatiotemporal characteristics of energy consumption carbon emissions in Xinjiang from 2000 to 2020 using spatial autocorrelation based on the data obtained from Xinjiang Statistical Yearbook. Results indicate that the total carbon emission intensity from energy consumption in Xinjiang shows an increasing trend every year during the study period. Nevertheless, the overall trend reveals a reduction in the intensity of carbon emissions. The spatial distribution of carbon emission intensity shows that the eastern slope of Tianshan Mountain has a high carbon emission intensity, whereas the northern edge of Junggar, the northern slope of Tianshan Mountain, and the northern slope of Kunlun Mountain has a low carbon emission intensity. These regions exhibit evident clustering characteristics. Considering global warming and carbon emission reduction, Xinjiang must work toward achieving the goals of “carbon peak” and “carbon neutrality” while promoting high-quality socioeconomic development in the area through the implementation of a multi-energy, complementary green energy network.

Keywords: carbon emission intensity; energy consumption; spatiotemporal characteristics; approach to adjustment; Xinjiang